

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02558

研究課題名（和文）単層カーボンナノチューブにおける励起子エンジニアリング

研究課題名（英文）Exciton engineering in single-walled carbon nanotubes

研究代表者

加藤 雄一郎 (Kato, Yuichiro)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：60451788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：カイラリティを同定したカーボンナノチューブを用いて、励起子の生成や緩和等の諸過程を制御する手法を実験的に検証した。アントラセン媒介転写法を開発してカーボンナノチューブの決定論的デバイス組み込みを実現し、ペンタセン装飾により励起子のエネルギー環境を変調して量子発光の特性改善を実証した。微小光共振器による量子電気力学効果を利用して明るい励起子の発光量子効率を定量的に求めることに成功したほか、気相化学反応を用いた架橋カーボンナノチューブへの量子欠陥導入を実現した。二次元物質との異次元ヘテロ構造を作製し、励起子移動が起きていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発光効率の高い架橋カーボンナノチューブにおいて、有機分子を用いた誘電率の局所変調と量子欠陥導入という二つの手法により、励起子発光の制御が可能であることを示せた。さらに、明るい励起子の発光量子効率がほぼ100%であることを明らかにできた。いずれもカーボンナノチューブの量子発光応用に資する成果である。また、カイラリティを同定したカーボンナノチューブと層数を同定した二次元物質による異次元ヘテロ構造の作製に初めて成功し、新たな励起子現象を観測した。原子精度で構造が分かっているナノ物質により構成されるデバイス実現への発展が期待される。

研究成果の概要（英文）：Various excitonic processes were studied using chirality-identified carbon nanotubes. The anthracene-assisted transfer technique was developed to achieve deterministic integration of carbon nanotubes into device structures. Pentacene decoration was used to modulate the exciton energy landscape for improving the quantum emission characteristics. The radiative quantum efficiency of bright excitons in carbon nanotubes were determined by modifying the exciton dynamics through cavity quantum electrodynamical effects. The formation of quantum defects in air-suspended nanotubes using a vapor-phase reaction was demonstrated. Mixed-dimensional heterostructures with two-dimensional materials were fabricated, where exciton transfer was observed.

研究分野：光物性・ナノデバイス物理

キーワード：ナノチューブ・グラフェン 光物性 ナノ構造物性 ナノ物性制御 ナノマイクロ物理

1. 研究開始当初の背景

単層カーボンナノチューブはグラフェンを巻いて筒にした構造(図1)を持ち、その巻き方はカイラリティ(n,m)という整数の組み合わせにより原子レベルで一意に定まる(図2)。直径が1 nm程度と小さいため、nやmの値がひとつ変わるだけでもエネルギー準位が離散的に変化し、分光測定(図3)を用いることで一本一本のカイラリティを同定して原子配列を簡便に決定することができる。原子レベルで同一の構造を持つナノチューブを使うことで信頼性の高い検証実験が可能であり、構造が完全に特定できるために物性物理学の観点からの理解が進んでいる。加えて、デバイスに組み込むことも容易なため、ナノテクノロジーを超えた原子精度技術の可能性を模索する機会を提供してくれる物質でもある。特に、室温でも安定な励起子が示す量子性や微小光共振器との結合による量子電気力学効果など、常温常圧下での量子効果の利用が期待される。

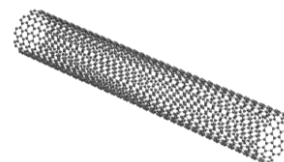


図1：単層カーボンナノチューブの模式図

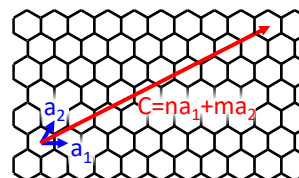


図2：グラフェンを筒にしたときに円周に相当するベクトルCは基本並進ベクトルa1とa2を用いてカイラリティ(n,m)で指定でき、これによって構造が原子レベルで一意に定まる。

2. 研究の目的

そこで、本研究では単層カーボンナノチューブにおける励起子エンジニアリングに取り組んだ。カイラリティを同定したカーボンナノチューブを用いて、励起子の生成や緩和等の諸過程を制御する手法を実験的に検証し、また、未解明の励起子物性現象を調査し理解することで、さらに新たな制御手法の開拓へとつなげることをねらった。

3. 研究の方法

独自手法であるカイラリティ・オン・デマンド測定を駆使して研究を推進した。再現性の高い自動ステージを組み込んだ自作の通信波長帯蛍光顕微分光装置に、精密測定した基板上の標識の位置を元に実座標と基板上の座標の線形変換を行う仕組みを実装しており、基板上のどの位置でも常に焦点を合わせた状態で長時間に渡って走査測定することや、離れた位置に移動しても再現性高く元の位置に戻ってくることが可能である。本測定系により多数の単一ナノチューブを評価し、その位置およびカイラリティをデータベース化することで、合成時に選択することはできなくとも所望のカイラリティを容易に測定対象とすることができる。

励起子の制御については、主に微小光共振器を用いる手法と有機分子を用いる手法に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) カーボンナノチューブの決定論的配置によるナノ光デバイス作製

微小共振器中では量子電気力学効果により励起子の発光緩和を増強することができる。しかし、共振器との結合を得るには発光波長の合うカイラリティのカーボンナノチューブを用いる必要があり、また、デバイスに組み込む際に発光強度が劣化しないように清浄な表面を維持することも重要である。そこで、容易に昇華可能なアントラセン分子の単結晶を媒介物質とすることで、所望のカイラリティを有するカーボンナノチューブを高効率発光する状態を維持したまま任意の位置に配置できる技術を開発した[1]。アントラセン結晶上ではナノチューブが明るく発光することを利用し、転写プロセス中のその場蛍光分光により構造を同定したナノチューブをサブミクロンの位置精度で配置することを実現した。デバイス作製の一例として、フォトニック結晶微小光共振器に合致するナノチューブを選定し、六

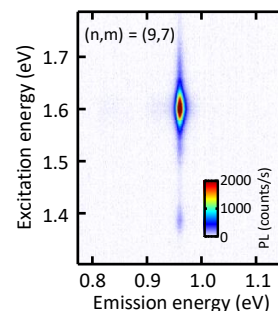


図3：単一ナノチューブの励起分光マッピング。発光波長と励起共鳴波長の組み合わせから(n,m)が同定可能である。

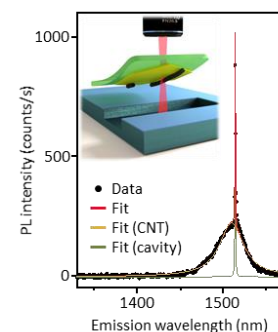


図4：微小光共振器の基底モードに結合した単一ナノチューブの発光スペクトル。挿入図は操作過程の一部を示す。

方晶窒化ホウ素の極薄膜を介してその発光を結合させた (図4)。本手法は、カーボンナノチューブ以外にも原子層物質などの転写に利用でき、原子レベルで構造が定まる材料を構成要素として精密なナノデバイスを構築するために活用可能であり、後述の異次元ヘテロ構造の作製においても重要な役割を果たした。

(2) ペンタセン装飾カーボンナノチューブによる量子発光

カーボンナノチューブの発光は、電子と正孔が強く束縛された励起子の挙動に左右されるが、原子1層からなる構造をしているため、励起子のエネルギーは誘電環境に非常に敏感である。そこで、架橋カーボンナノチューブを有機分子の一種であるペンタセンのナノ粒子で装飾することで、励起子のエネルギー環境を局所的に変化させて励起子拡散と緩和に影響を与え、室温での単一光子発生を改善する新しい手法を実証した[2]。真空蒸着法によってカーボンナノチューブをペンタセンナノ粒子で装飾し (図5)、フォトルミネッセンス励起分光測定により調査したところ、装飾された部位の励起子のエネルギーが誘電遮蔽効果により低下し、赤方偏移したピークが新たに検出されることが分かった。二つの異なる発光ピークに対応するフォトルミネッセンス強度の励起パワー依存性の測定からは、ペンタセン装飾部位への励起子移動により励起子対消滅が増強されていることが明らかとなった。さらに、光子相関測定により室温単一光子発生を確認し、単一光子純度を高めるためにペンタセンによる装飾が有効であることが示唆される結果を得た。

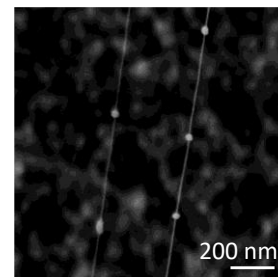


図5：ペンタセン装飾カーボンナノチューブの電子顕微鏡写真。

(3) カーボンナノチューブにおける明るい励起子の発光量子効率

架橋カーボンナノチューブの明るい励起子において、発光デバイス性能を決める基本的な物理量である発光量子効率を定量的に評価した。発光量子効率は励起子の発光緩和と非発光緩和過程の割合で決まるため、微小共振器中で生じる量子電気力学効果により発光緩和を選択的に増強し、その変化を計測することで発光量子効率を求めた[3]。微小共振器としては架橋カーボンナノチューブに高効率で光結合することが可能なフォトニック結晶空気モードナノビーム共振器を利用し、発光効率低下を避けるためカーボンナノチューブと共振器が直接接触することを防ぐデバイス構造を開発した。基板上に多数のデバイスを準備して自動測定により光結合を示すものを抽出し、発光スペクトルと緩和時間 (図6) を測定した結果、明るい励起子の発光量子効率はほぼ100%であることが判明した。本結果により、カーボンナノチューブを用いた光デバイスの高効率化には明るい励起子の生成効率をいかに高めるかが重要であることが明らかになった。

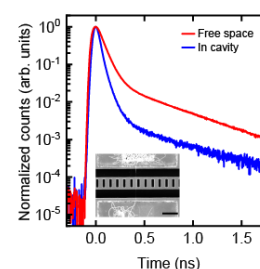


図6：発光減衰曲線の比較。挿入図は作製したデバイスの電子顕微鏡像。

(4) 架橋カーボンナノチューブにおける気相化学反応を用いた量子欠陥の導入

カーボンナノチューブを分子修飾することで励起子を局在化させて単一光子を発生させることができるが、通常は溶液中での化学反応が用いられる。そこで、気相光化学反応により発光効率の高い清浄な架橋カーボンナノチューブに対して量子欠陥を導入する手法を開発した[4]。ヨードベンゼンの蒸気と紫外光により反応を起こすことで、通常の励起子発光より低エネルギー側に量子欠陥由来の発光ピークが観測された (図7)。この反応方法により、高効率発光に必要な不可欠な架橋構造を維持したまま、量子欠陥を直接導入することが可能となった。2000本以上のナノチューブについて、反応前後の発光スペクトルを統計的に解析し、化学反応性や量子欠陥エネルギーのナノチューブ直径依存性を明らかにした。励起子拡散モデルを用いた発光強度のシミュレーションを実験結果と比較することで、直径が小さいほど反応性が高く、より高密度に欠陥が導入されることが明らかとなった。架橋カーボンナノチューブへの気相化学反応が可能になったことで、反応分子数の精密な制御が実現し、単

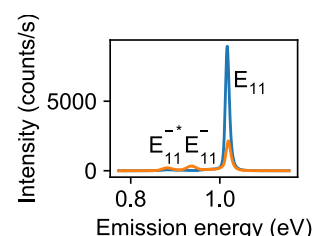


図7：気相光化学反応の前 (青) と後 (橙) での発光スペクトルの比較。 E_{11} はナノチューブの励起子発光、 E_{11}^- と E_{11}^* は発光中心からの発光によるピーク。

一分子レベルで量子欠陥を導入できる技術へと発展することが期待される。

(5) 異次元ヘテロ構造における励起子移動

本研究でアントラセン媒介転写法の開発に成功したことによって、カイラリティを同定したカーボンナノチューブと層数を同定した二次元物質による異次元ヘテロ構造の作製が可能になった。これは研究開始当初には計画していなかった新たな展開で、架橋カーボンナノチューブにセレン化タングステンを転写したヘテロ構造では、励起子移動が観測された[5]。フォトルミネッセンス励起分光において転写後に新たな吸収ピークが現れ(図8)、カーボンナノチューブの直接励起と比較すると、より大きな吸収断面積、広範囲のスペクトル応答、偏光に依存しないなどのセレン化タングステンに由来する吸収特性を示すことが分かった。系統的にカーボンナノチューブのバンドエネルギーを変化させたヘテロ構造を用いて励起子移動の起源を調査したところ、バンドエンジニアリングにおいて重要となるバンドエネルギーの不連続性と相対的な配置が判明したほか、バンドエネルギーが一致した際には共鳴的に励起子移動が起きることを見出した。

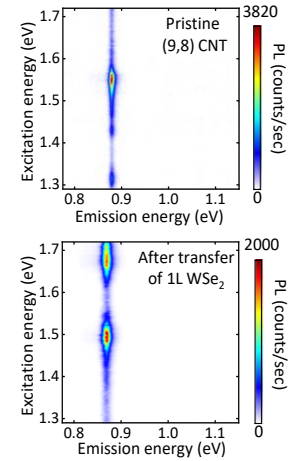


図8：異次元ヘテロ構造形成前後の分光特性の変化。

<引用文献>

- [1] K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato, “Deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes for atomically defined technology,” *Nature Commun.* **12**, 3138 (2021).
- [2] Z. Li, K. Otsuka, D. Yamashita, D. Kozawa, Y. K. Kato, “Quantum emission assisted by energy landscape modification in pentacene-decorated carbon nanotubes,” *ACS Photonics* **8**, 2367 (2021).
- [3] H. Machiya, D. Yamashita, A. Ishii, Y. K. Kato, “Evidence for near-unity radiative quantum efficiency of bright excitons in carbon nanotubes from the Purcell effect,” *Phys. Rev. Research* **4**, L022011 (2022).
- [4] D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato, “Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction,” *Nature Commun.* **13**, 2814 (2022).
- [5] N. Fang, Y. R. Chang, D. Yamashita, S. Fujii, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato, “Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes,” *Nature Commun.* **14**, 8152 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 N. Fang, Y. R. Chang, D. Yamashita, S. Fujii, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato	4. 巻 14
2. 論文標題 Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Commun.	6. 最初と最後の頁 8152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-43928-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A. El-Refaey, D. Kozawa, T. Kameda, Y. K. Kato, Y. Ito, M. Kawamoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Diameter-selective sorting of single-walled carbon nanotubes using -molecular tweezers for energy materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Appl. Nano Mater.	6. 最初と最後の頁 1919
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnm.2c04877	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 B. Yu, S. Naka, H. Aoki, K. Kato, D. Yamashita, S. Fujii, Y. K. Kato, T. Fujigaya, T. Shiraki	4. 巻 16
2. 論文標題 ortho-substituted aryldiazonium design for the defect configuration-controlled photoluminescent functionalization of chiral single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 21452
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.2c09897	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Fang, D. Yamashita, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato	4. 巻 10
2. 論文標題 Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Adv. Opt. Mater.	6. 最初と最後の頁 2200538
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adom.202200538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 R. Zhang, Y. Feng, H. Li, A. Kumamoto, S. Wang, Y. Zheng, W. Dai, N. Fang, M. Liu, T. Tanaka, Y. K. Kato, H. Kataura, Y. Ikuhara, S. Maruyama, R. Xiang	4. 巻 199
2. 論文標題 Fabricating one-dimensional van der Waals heterostructures on chirality-sorted single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2022.07.076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato	4. 巻 13
2. 論文標題 Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Commun.	6. 最初と最後の頁 2814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30508-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Machiya, D. Yamashita, A. Ishii, Y. K. Kato	4. 巻 4
2. 論文標題 Evidence for near-unity radiative quantum efficiency of bright excitons in carbon nanotubes from the Purcell effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 L022011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L022011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Z. Li, K. Otsuka, D. Yamashita, D. Kozawa, Y. K. Kato	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantum emission assisted by energy landscape modification in pentacene-decorated carbon nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.1c00539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato	4. 巻 12
2. 論文標題 Deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes for atomically defined technology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Commun.	6. 最初と最後の頁 3138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-23413-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato	4. 巻 6
2. 論文標題 Waveguide coupled cavity-enhanced light emission from individual carbon nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 31302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0042635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計40件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Exciton physics and cavity quantum electrodynamics in air-suspended carbon nanotubes
3. 学会等名 The 36th International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2024) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Organic color centers in carbon nanotubes for telecom-band single photon generation at room temperature
3. 学会等名 33rd International Conference on Diamond and Carbon Materials (ICDCM 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Carbon nanotubes and atomically thin materials integrated with silicon photonic crystal nanocavities
3. 学会等名 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Excitons in carbon nanotubes meet layered materials: Mixed-dimensional heterostructures for nanoscale photonics
3. 学会等名 Symposium on Fundamental, Structural and Optical Properties of 1D and 2D Materials and Their Heterostructures in NT23 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato
2. 発表標題 Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction
3. 学会等名 243rd Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato
2. 発表標題 Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction
3. 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia, the 83rd JSAP Autumn Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Excitons in carbon nanotubes meet layered materials: Mixed-dimensional heterostructures for nanoscale photonics
3. 学会等名 8th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (WONTON2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Exciton physics and cavity quantum electrodynamics in air-suspended carbon nanotubes
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato
2. 発表標題 Deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes for atomically defined technology
3. 学会等名 241st Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Li, K. Otsuka, D. Yamashita, D. Kozawa, Y. K. Kato
2. 発表標題 Quantum emission assisted by energy landscape modification in pentacene-decorated carbon nanotubes
3. 学会等名 241st Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Kozawa, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Elucidating Upconversion Photoluminescence Mechanisms in Air-Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia, the 84th JSAP Autumn Meeting 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Hybrid silicon all-optical switching devices integrated with two-dimensional materials
3 . 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia, the 84th JSAP Autumn Meeting 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets
3 . 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia, the 83rd JSAP Autumn Meeting 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Formation of Organic Color Centers in Air-Suspended Carbon Nanotubes Using Vapor-Phase Reaction
3 . 学会等名 8th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (WONTON 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Waveguide-coupled narrow-linewidth photoluminescence from a single carbon nanotube
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Waveguide coupled cavity-enhanced light emission from individual carbon nanotubes
3 . 学会等名 8th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (WONTON 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Fang, Y. R. Chang, D. Yamashita, S. Fujii, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes
3 . 学会等名 The 66th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 N. Fang, D. Yamashita, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Optical properties of 1D/2D mixed dimensional heterostructures and their integration into photonic devices
3. 学会等名 第69回応用物物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Bright- and dark-exciton dynamics in carbon nanotubes
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. K. Kato
2. 発表標題 Excitons in covalently and non-covalently functionalized air-suspended carbon nanotubes
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato
2. 発表標題 Deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes for atomically defined technology
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia, the 82nd JSAP Autumn Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes for atomically defined technology
3 . 学会等名 The 61st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Creation of Organic Color Centers in Air-Suspended Carbon Nanotubes Using Vapor-Phase Reaction
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Machiya, D. Yamashita, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Near-Unity Radiative Quantum Efficiency of Excitons in Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Machiya, D. Yamashita, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Near-Unity Radiative Quantum Efficiency of Excitons in Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 239th Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Otsuka, N. Fang, D. Yamashita, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Deterministic dry transfer of carbon nanotubes into photonic devices using single-crystalline anthracene
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Diameter-dependent Photoluminescence Properties in Color Centers of Air-Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 March Meeting of the American Physical Society (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 N. Fang, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Hexagonal boron nitride as an ideal substrate for carbon nanotube photonics
3 . 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 N. Fang, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Hexagonal boron nitride as an ideal substrate for carbon nanotube photonics
3 . 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia, the 81st JSAP Autumn Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Z. Li, K. Otsuka, D. Yamashita, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Directional exciton diffusion in pentacene-decorated carbon nanotubes
3 . 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia, the 81st JSAP Autumn Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Waveguide coupled cavity-enhanced light emission from individual carbon nanotubes
3 . 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Analytical Estimation of Color Center Density Formed in Air-Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Yamashita, H. Machiya, K. Otsuka, A. Ishii, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Waveguide coupled cavity-enhanced light emission from individual carbon nanotubes
3 . 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Analytical Estimation of Quantum Emitters Formed in Air-Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes
3 . 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Otsuka, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Anthracene-assisted deterministic transfer of optical-quality carbon nanotubes
3 . 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Diameter-dependent photoluminescence properties in color centers of air-suspended single-walled carbon nanotubes
3 . 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium,
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2 . 発表標題 Formation of quantum emitters in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction
3 . 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato
2. 発表標題 Diameter-dependent photoluminescence properties in color centers of air-suspended single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（物性）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Li, K. Otsuka, D. Yamashita, Y. K. Kato
2. 発表標題 Directional exciton diffusion in pentacene-decorated carbon nanotubes
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 反応制御装置及び反応制御方法	発明者 加藤雄一郎、小澤大知、塩田勇人	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2023-190561	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

理化学研究所 加藤ナノ量子フォトニクス研究室 http://katogroup.riken.jp/

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	メリーランド大学			
中国	浙江大学			